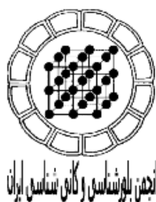
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و هشتم، شمارهٔ سوم، پاییز ۹۹، از صفحهٔ ۶۹۷ تا ۷۱۰



بارزسازی کانه‌زایی روی - سرب و دگرسانی‌های همراه در کانسار مهدی‌آباد، استان یزد، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر و لندست۸ -OLI

زهرا بنیادی*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

(دریافت مقاله: ۹۸/۸/۴، نسخه نهایی: ۹۸/۱۰/۲۵)

چکیده: کانسار روی- سرب مهدی‌آباد در شرق شهرستان مهریز، کانساری با میزبان کربناتی است که در دولومیت‌های سازند تفت جای دارد. این کانسار از بخش‌های اکسیدی-کربناتی و سولفیدی تشکیل شده است. برای بارزسازی پهنه‌های مختلف کانه‌زایی و دگرسانی‌های همراه، روش‌های مختلف پردازشی بر تصاویر چندطیفی استر و لندست OLI-۸ اعمال شد. در بارزسازی پهنه‌های کانه‌زایی و دگرسانی‌های همراه در تصاویر OLI، روش‌های تحلیل مولفه‌های اصلی، تحلیل مولفه‌های مستقل و ترکیب‌های بندی بر پایه نسبت‌های نواری عملکرد خوبی دارند. در تصاویر استر، بهترین نتایج از روش‌های تحلیل مولفه‌های اصلی و جداسازی طیفی خطی به دست آمد. بر پایه نتایج به دست آمده، در مناطقی که پهنه گوسان و دگرسانی سیدریتی هم‌پوشی دارند، کانه‌زایی روی- سرب صورت گرفته است. درستی نتایج این پردازش‌های طیفی با بررسی های میدانی و نتایج پراش پرتو ایکس نمونه‌ها تایید شد.

واژه‌های کلیدی: *کانه‌زایی روی-سرب؛ دگرسانی؛ بارزسازی؛ استر؛ OLI؛ کانسار مهدی‌آباد؛ ایران مرکزی.*

مقدمه

پردازش تصاویر ماهواره‌ای نقش به‌سزایی در بسیاری از جنبه‌های علوم زمین دارد. در چند دهه گذشته، نسل جدیدی از سنجش از دور پیشرفته در تهیه نقشه‌های سنگ‌شناسی، اکتشاف مواد معدنی و زمین‌شناسی زیست‌محیطی به کار رفته است [۱-۳]. گسترش فن‌آوری سنجش از دور باعث شده است که اطلاعات جامعی در مورد کانی‌شناسی انواع مختلف سنگ در سطح زمین ارائه شود [۲، ۴-۷]، در نتیجه روش‌های بسیاری برای پردازش تصاویر به کاربرده شده‌اند که سعی در رسم مرزهای توده‌های سنگی، مناطق هوازده و سنگ‌های دگرسان شده گرمابی دارند [۸، ۹]. این پردازش‌ها به ویژه در مناطق خشک که کمترین پوشش گیاهی را دارند، موفق عمل کرده‌اند [۱۰]. به کارگیری روش‌های پردازشی تصاویر چند طیفی با قدرت تفکیک طیفی به نسبت بالا می‌تواند در تشخیص و ردیابی کانه‌زایی‌های احتمالی پیرامون رگه‌های کربناتی دربردارنده سرب و روی موثر باشد [۱۱].

ماهواره لندست ۸ (Landsat) که در سال ۲۰۱۳ به فضا پرتاب شد دارای دو حسگر OLI (Operational Land Imager) و TIRS (Thermal Infrared Sensor) است. تصاویر این دو سنجنده ۹ نوار مرئی، فروسرخ نزدیک و فروسرخ با طول موج کوتاه و دو نوار فروسرخ گرمایی با طول موج بلند دارند. این تصاویر به دلیل برخورداری از نسبت بالای نوفه به سیگنال و قدرت تفکیک پرتوسنجی بالا (داده‌های ۱۲ بیتی)، توانایی بیشتری برای بارزسازی پدیده‌های سطح زمین دارند. قدرت تفکیک مکانی داده‌های لندست ۸ برابر با ۱۵ متر (نوار هم رنگ) تا ۱۰۰ متر (نوارهای گرمایی) است [۱۲]. بیرانوندپور و همکاران [۱۳] از این تصاویر برای نقشه‌برداری از مناطق دگرسانی گرمایی استفاده کردند.

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۸۳۳۹۰۱۳۱۵، نمابر: ۰۲۸۳۳۷۸۰۰۴۰، پست الکترونیکی: bonyadi@sci.ikiu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]

سنجنده استر[1]، بر ماهواره ترا[2] (EOS)، در سال ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شد. تصاویر این سنجنده دارای نسبت سیگنال به نوفه پایین‌تری نسبت به تصاویر OLI بوده و ۸ بیتی هستند، اما توان تفکیک طیفی بالاتری دارند این سنجنده داده‌ها را در تعداد نوارهای بیشتری ثبت کرده و در نتیجه اطلاعات طیفی مفیدی را به زمین‌شناسان ارائه می‌دهد [۶]. داده‌های استر با موفقیت برای نقشه‌برداری سنگ‌شناسی و اکتشافات مواد معدنی [۷] استفاده شده است [۱۴]. کانی‌های آهن‌دار، کربناتها، هیدروکسیدها و کانی‌های آبدار دارای ویژگی جذب مولکولی در نوارهای مرئی و فروسرخ نزدیک (VNIR) و فروسرخ موج کوتاه (SWIR) هستند [۴]. به همین دلیل این نوارها در بارزسازی کانی‌های نام برده اهمیت ویژه‌ای دارند.

در این پژوهش، عملکرد تصاویر چند طیفی استر و لندست ۸ و همچنین روش‌های مختلف پردازش تصویر مانند نسبت‌گیری نواری، ترکیب رنگی کاذب، تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، تحلیل مولفه‌های مستقل (ICA) و کسر کمترین نوفه (MNF) و روش‌های رده‌بندی نظارت شده مانند SAM و LSU و خالص‌سازی پیکسل‌ها (PPI) در تفکیک واحدهای سنگی و تشخیص دگرسانی‌ها و مناطق کانه‌دار سرب و روی در منطقه مهدی‌آباد مقایسه شده است.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی کانسار مهدی‌آباد

کانسار روی ـ سرب مهدی‌آباد در ۱۱۵ کیلومتری جنوب شرقی یزد و ۵۰ کیلومتری شرق مهریز واقع است. این کانسار در بخش مرکزی پهنه ساختاری ایران مرکزی و در چهارچوب نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ یزد قرار دارد. در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، این منطقه در محل تلاقی چهار نقشه زمین‌شناسی بهادران، بافق، فهرج و شمش واقع است.

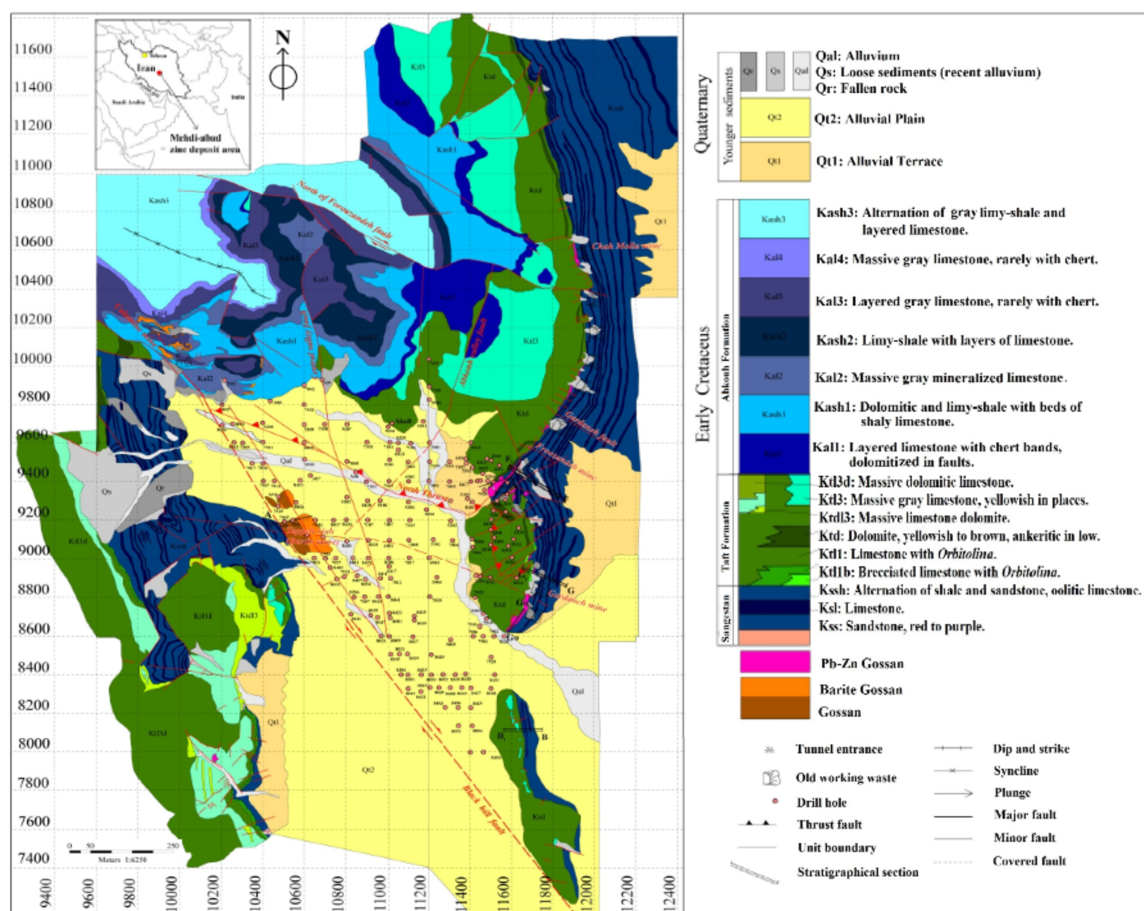
در گستره کانسار، سه سازند وجود دارند که همه مربوط به کرتاسه پیشین هستند و به ترتیب از قدیم به جدید عبارتند از (شکل ۱) *سازند سنگستان*: شامل ماسه سنگ، لای سنگ و شیل به همراه میان لایه‌های آهکی، *سازند تفت*: دربردارنده سنگ آهک و آهک دولومیتی که ارتفاعات شمالی کانسار را تشکیل می‌دهد، و *سازند آبکوه*: شامل توالی کربناتی همراه با شیل و مارن.

سنگ‌های آهکی و دولومیتی در سازند تفت و بخش میانی سازند آبکوه میزبان‌های اصلی کانه‌زایی هستند [۱۵]. دو گسل اصلی از نوع عادی با روندهای شمال غربی ـ جنوب شرقی و شمالی ـ جنوبی واحدهای سنگ شناسی را جابجا کرده‌اند. افزون بر این دو گسل، ۹ گسل کوچکتر بر کانسنگ‌ها و سنگ‌های دربرگیرنده اثر گذاشته‌اند (شکل ۱). از این میان، گسل‌های تپه سیاه در غرب، گسل دره مرکزی در بخش مرکزی و گسل تراست شرقی در شرق کانسار اهمیت بیشتری دارند [۱۷،۱۶].

کانسنگ‌های سولفیدی بیشتر در دو بخش سولفیدی شرقی و سولفیدی غربی و پهنه گستره جنوبی جای دارند، که توسط رسوب‌های آبرفتی پوشیده شده‌اند. کانه‌های اصلی در این بخش‌ها اسفالریت، گالن و باریت هستند. کانسنگ غربی توسط توده‌های باریت پوشیده شده است. در بخش‌های سطحی پهنه تپه سیاه و پهنه اکسیده شرقی، کانسنگ‌های کربناتی و اکسیدی (گوسان) قرار دارند. کانسنگ های کربناتی بیشتر شامل کانه های اسمیت زونیت، هیدروزنسیت، همی‌مورفیت و سروزیت بوده و کانی‌های باطله شامل آنکریت، کلسیت، دولومیت، لیمونیت، هماتیت و کانی‌های رسی هستند. در پهنه اکسیدی شرقی، اکسیدهای آهن و منگنز به بسیاری وجود دارند. بافت کانسنگ در بخش‌های مختلف کانسار به صورت شکافه پرکن و برشی است. در ارتفاعات شمالی کانسار مهدی‌آباد نیز پهنه کالامین شامل کربنات و سیلیکات روی عیار بالا به همراه اکسید آهن حضور دارد [۱۸،۱۶]. پهنه کالامین در سازند آبکوه واقع شده و توسط گسل‌ها از بخش اصلی کانسار جدا شده است [۱۹]. دگرسانی‌های وابسته به کانه‌زایی هنوز به طور کامل مشخص نشده‌اند و پژوهش‌هایی در ارتباط با ماهیت و گسترش این کانه‌زایی‌ها در دست انجام است. با اینحال به نظر می‌رسد که دگرسانی‌های اصلی دولومیتی شدن، سیدریتی و آنکریتی شدن هستند. بررسی‌های انجام شده پیشین خاستگاه کانسار در بخش‌های سولفیدی از نوع دره می سی سی پی گزارش کرده‌اند [۱۵-۱۷].

1 - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
2 - Terra

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی منطقه مهدی‌آباد [۱۷]. که گسل‌ها و گمانه‌های حفر شده بر آن نشان داده شده‌اند.

داده‌ها و روش‌ها

داده‌ها

در این پژوهش از تصویر ماهواره‌ای لندست ۸ سنجنده‌های OLI سری L1TP مربوط به تاریخ ۲۱ مارس ۲۰۱۹، به شماره مسیر ۱۶۱و ردیف ۰۳۸ استفاده شد. این مجموعه از تصاویر دارای تصحیحات پرتوسنجی و هندسی بوده و دارای بالاترین سطح کیفی در میان تصاویر لندست ۸ هستند. تصویر ماهواره‌ای استر استفاده شده نیز از مجموعه L1T مربوط به تاریخ ۱۳ جولای ۲۰۰۳ بوده که تصحیح هندسی و پرتوسنجی بر آن اعمال شده است، ولی مقادیر DN آن به صورت درخشش (رادیانس) بوده و باید با اعمال تصحیح جوی تبدیل به مقادیر بازتابش شوند.

از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ یزد [۲۰]، نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ بافق [۲۱]، فهرج [۲۲] و بهادران [۲۳] و نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰ منطقه معدنی مهدی‌آباد [۱۷] برای تفسیر داده‌های به دست آمده از پردازش تصاویر ماهواره‌ای استفاده شد. برای درستی سنجی نتایج به دست آمده، بازدیدهای صحرایی و پراش پرتو ایکس (XRD) انجام شد. از نرم افزارهای ENVI 5.2 و ARCGIS 10.2 برای پردازش تصاویر استر و OLI و تهیه تصاویر خروجی استفاده گردید. پیش پردازش‌ها و پردازش‌های اعمال شده بر روی تصاویر در ادامه توضیح داده شده‌اند.

تصحیح جوی

در این پژوهش، برای انجام تصحیح پرتوسنجی در تصویر استر، پس از یکسان سازی اندازه پیکسل‌ها در نوارهای VNIR و SWIR به عدد ۳۰ متر، واسنجی بازتابش انجام گرفت و تصویر رادیانس به بازتابش تبدیل شد. سپس تصحیح جو به روش تحلیل سریع خط دید جو از طریق طیف ابرمکعب ها (FLAASH)[3] اجرا شد. برای تصویر OLI نیز همین مراحل انجام شد، با این تفاوت که اندازه پیکسل‌ها ۳۰ متر باقی ماند.

3 -Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]

تقسیم نواری و ترکیب رنگی کاذب

تقسیم نواری یا نسبت‌گیری نواری روشی است که در آن ارزش رقومی (DN)[4] پیکسل‌ها در یک نوار به ارزش رقومی همان پیکسل‌ها در نوار دیگر تقسیم می‌شود. نوارها بر اساس ویژگی‌های طیفی پدیده مورد بررسی انتخاب می‌شوند. نواری که در آن پدیده مورد نظر بالاترین بازتاب را دارد، بر نوار با کمترین بازتاب (بیشترین جذب) تقسیم شده و به این ترتیب، آن پدیده به خوبی بارزسازی می‌شود [۲۴]. از تصاویر برآمده از تقسیم نواری می توان در ساخت ترکیب‌های رنگی (RGB) متعدد برای بهبود تشخیص چشمی پدیده‌های طبیعی استفاده نمود.

تحلیل مولفه‌های اصلی

هدف از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) کاهش حجم و فشرده‌سازی چند نوار طیفی دارای همبستگی به تعداد کمتری از نوارهای طیفی بدون همبستگی است [۷]. این روش بر پایه مجموعه‌ای از محورهای عمود بر هم که خاستگاه آنها در میانگین داده‌ها و در جهت بیشترین واریانس داده‌هاست، تعدادی نوار PC ایجاد می‌کند [۱۰]. این فشرده‌سازی داده‌های تکراری را از بین می‌برد، نوفه را در آخرین PC ها قرار می‌دهد و بنابراین امضاهای طیفی را از پس‌زمینه جدا می‌کند. این روش در افزایش تمایز میان پدیده‌های مختلف و در نتیجه تهیه نقشه‌های دگرسانی و سنگ شناسی کاربرد بسیاری دارد [۷،۵].

تحلیل مولفه‌های مستقل

تحلیل مولفه‌های مستقل (ICA) مولفه‌های تصادفی و مخلوط را به مولفه‌های مستقل و با توزیع غیرگاؤسی تبدیل می‌کند. مستقل بودن مولفه‌ها یا ضرایب تبدیل، روش ICA را از سایر روش‌ها مانند PCA و کمترین نوفه (MNF) متمایز می‌کند. در تبدیل‌های PCA و کسر MNF از آماره‌های مرتبه دوم استفاده می‌شود، در حالیکه روش ICA از آماره‌های مرتبه بالاتری استفاده می‌کند، در نتیجه پدیده‌هایی که در روش PCA پیکسل‌های کمی را به خود اختصاص می‌دهند و قابل شناسایی نیستند، می‌توانند با این روش بارزسازی شوند. روش ICA در واقع بسط روش PCA است [۲۵]. ICA می‌تواند اطلاعات طیفی بیشتری را نسبت به PCA و MNF استخراج کرده و در تفکیک واحدهای سنگ شناسی عملکرد بهتری داشته باشد. در سنجش از دور، این روش برای کاهش نوفه، استخراج ناهنجاری‌ها و پدیده‌های مورد نظر، رده‌بندی و تهیه نقشه به کار می‌رود [۲۶]. روش ICA بهترین روش برای کاهش بُعد تصاویر است [۲۷].

تبدیل کسر کمترین نوفه

تبدیل کسر کمترین نوفه (MNF)، یک تبدیل خطی است که با جدا کردن پیکسل‌ها از پس زمینه تصویر، وضوح تصویر را بالا می‌برد. نسبت سیگنال به نوفه در تصویر برآمده از این روش، بالاتر از تصاویر PCA است [۲۸]. از تبدیل کسر کمترین نوفه برای تعیین ابعاد ذاتی داده‌های تصویر، جدا کردن نوفه موجود در داده‌ها، کاهش حجم تصویر و افزایش سرعت محاسبات در پردازش‌های بعدی استفاده می‌شود [۳۰،۲۹].

خالص‌سازی پیکسل‌ها

در تصاویر چندطیفی و ابرطیفی شاخص خلوص پیکسل ها (PPI) برای یافتن پیکسل هایی که از نظر طیفی خالص هستند، به کار می‌رود. PPI با استفاده از نمودارهای پراکندگی n-بُعدی محاسبه می‌شود، به طوری که پیکسل‌های پایانی در نمودارهای پراکندگی به عنوان پیکسل‌های خالص در نظر گرفته می‌شوند. این شاخص اغلب برای تصاویر بدون نوفه اعمال می‌شود. به این منظور، از تصاویر MNF به عنوان تصاویر ورودی استفاده می‌شود. تعیین پیکسل‌های خالص کار دشواری است و فرایند مهمی در رده‌بندی و پردازش‌های طیفی به حساب می‌آید [۳۲،۳۱].

نقشه‌بردار زاویه طیفی

روش رده‌بندی نظارت شده نقشه‌بردار زاویه طیفی (SAM) شباهت طیفی را با محاسبه زاویه بین دو طیف و درنظر گرفتن آنها به صورت بردارهایی در فضای n بعدی اندازه‌گیری می کند. در این روش، نخست با استفاده از تبدیل MNF از ابعاد داده‌ها و اطلاعات فراوان موجود در تصاویر کاسته می‌شود. سپس با به کارگیری شاخص خلوص پیکسل (PPI)، خالص‌ترین پیکسل‌ها در تصویر تعیین شده و اجزای خالص پایانی با استفاده از ابزار n-Visualizer بعدی استخراج می‌شوند. اجزای خالص استخراج شده با طیف‌های شناخته شده از کتابخانه طیفی USGS مقایسه می‌شوند [۳۳].

جداسازی طیفی خطی

روش جداسازی طیفی خطی (LSU) با استفاده از ویژگی‌های طیفی کانی‌ها، فراوانی نسبی آنها را در تصاویر چندطیفی و ابرطیفی تعیین می‌کند. فرض بر این است که میزان بازتاب در

4 - Digital Number

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]

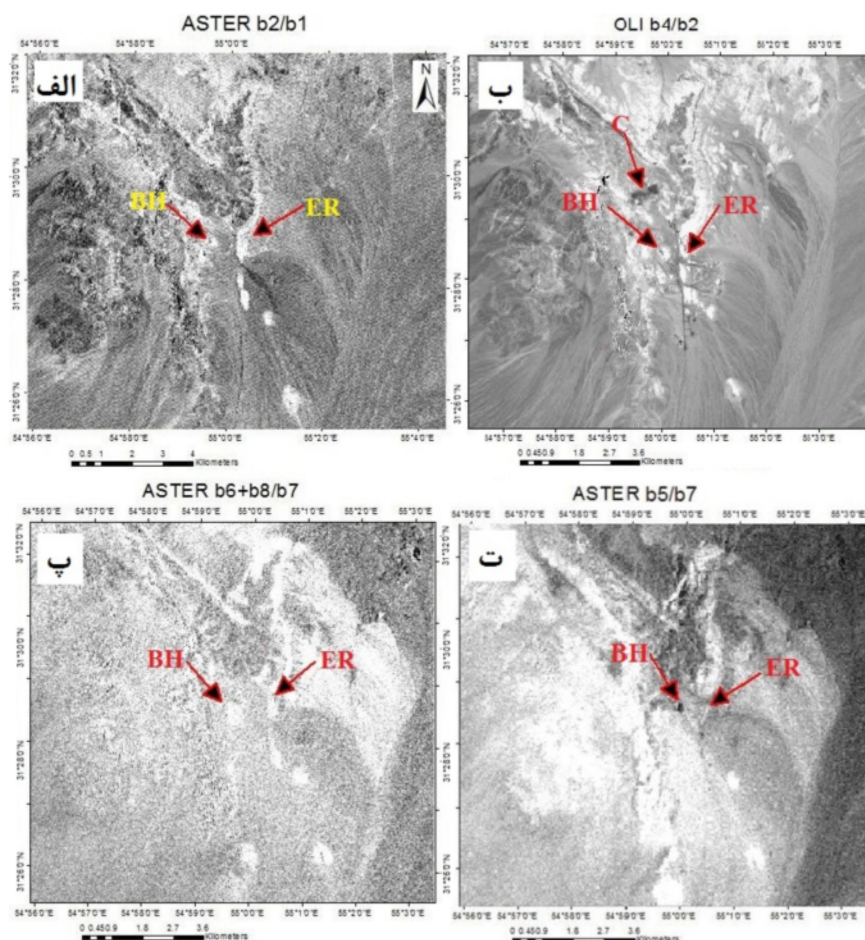
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]

هر پیکسل، ترکیبی خطی از بازتاب همه مواد (یا اجزای خالص) موجود در پیکسل است [۳۴]. پیکسل‌هایی با بیش از یک نوع از عوارض پیکسل‌های مخلوط هستند [۳۶،۳۵]. وجود پیکسل‌های مخلوط باعث می‌شود که روش‌های سنجش از دور موفقیت کاملی در استخراج اطلاعات از تصاویر نداشته باشند [۳۷]. به این دلیل، روش‌هایی برای مشخص کردن سهم هر نوع در سطح زیرپیکسل ابداع شده است؛ روش LSU یکی از آنهاست که با استفاده از طیف هر پیکسل (داده‌های ورودی) و طیف جزء خالص، مقدار فراوانی هر ماده (جزء خالص) را در هر پیکسل مشخص می‌کند.

نتایج

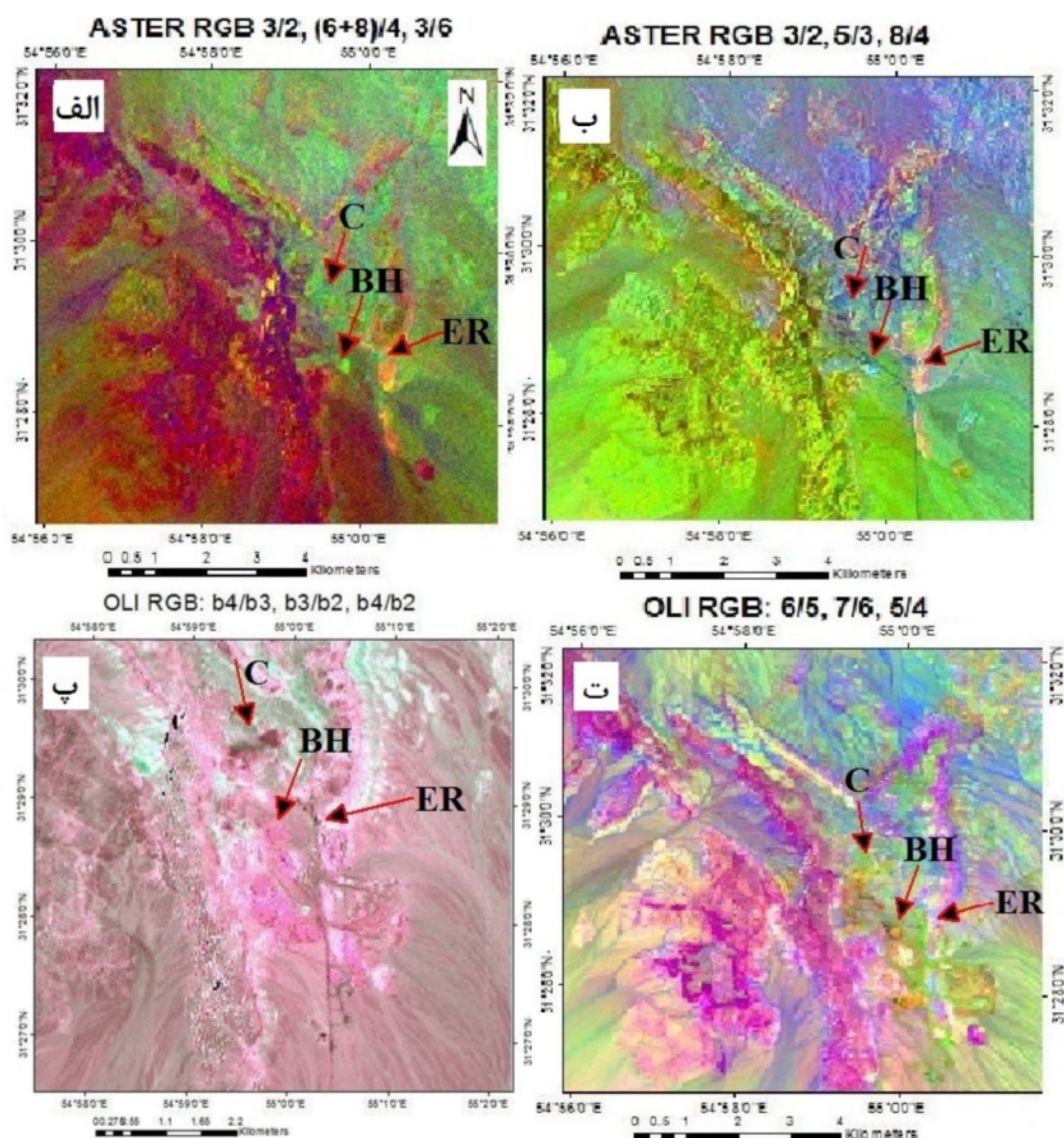
در نسبت نواری (BR) b2/b1 تصویر استر منطقه مهدی‌آباد، مناطق کانه‌دار کاملا روشن دیده می‌شوند (شکل ۲ الف). در تصویر به دست آمده از نسبت نواری b4/b2 تصویر OLI که معادل نسبت b3/b1 تصویر +ETM است، کانسار مهدی‌آباد در بخش‌هایی به رنگ سفید و در بخش‌هایی به رنگ خاکستری نمایان شد. این امر به دلیل بازتاب بالای آهن سه ظرفیتی در این طول موج است. ماسه‌سنگ‌ها (سازند سنگستان) نیز به دلیل دارا بودن آهن سه ظرفیتی روشن دیده می‌شوند (شکل ۲ ب). در تصویر استر، نسبت نواری b6+b8/b7 واحدهای دولومیتی را بارزسازی می‌کند (شکل ۲ پ). در این شکل، دولومیت‌های سازند تفت به رنگ روشن دیده می‌شوند. این واحدهای دولومیتی در نقاط کانه‌زایی شده نیز دیده می‌شوند. سازندهای سنگستان و آبکوه در این تصویر به رنگ تیره نمایان شده‌اند. دگرسانی کائولینیتی در تصویر استر با نسبت b5/b7 آشکار می‌شود (شکل ۲ ث).



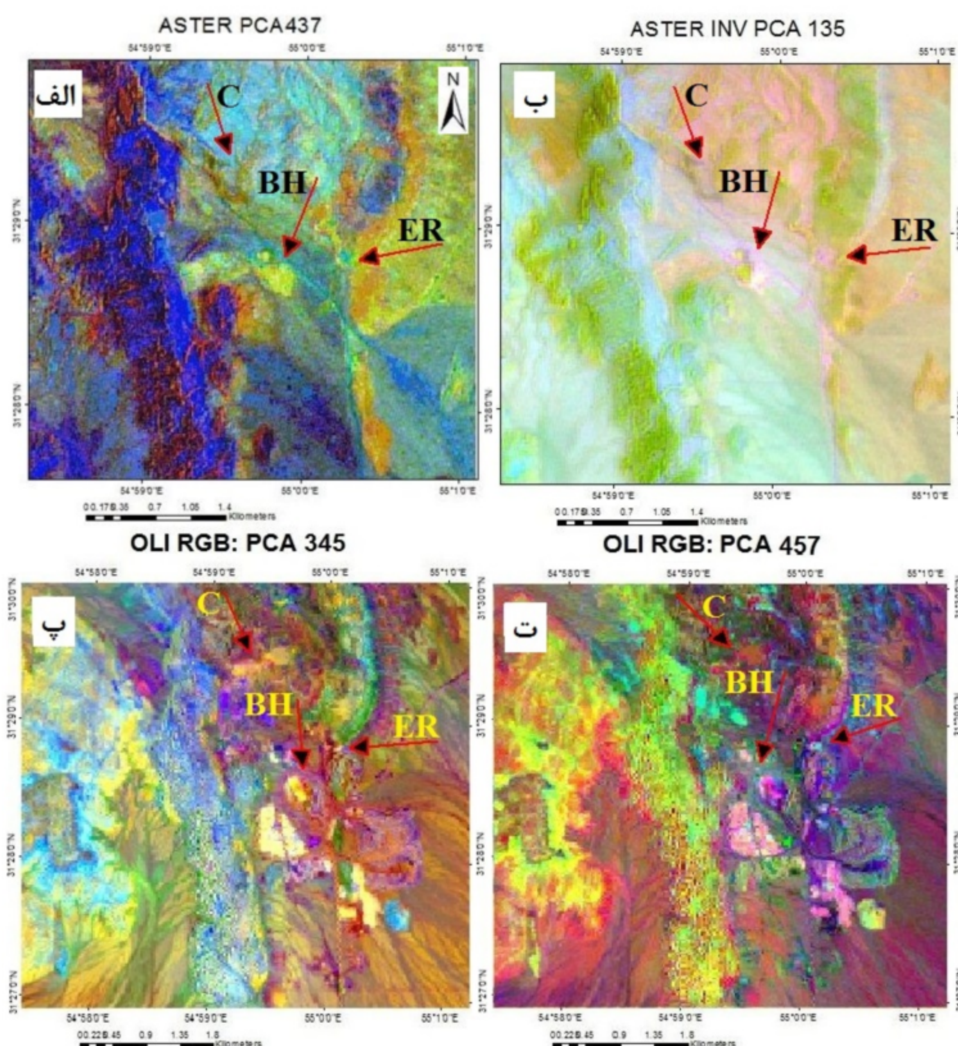
شکل ۲ الف) نسبت نواری b2/b1 در تصویر استر و ب) نسبت نواری b4/b2 در تصویر OLI. نقاط روشن در هر دو تصویر نشاندهنده آهن سه ظرفیتی هستند که هم در پهنه تپه سیاه (BH) و هم در پهنه کانسنگ شرقی (ER) حضور دارند. پهنه کالامین (C) در تصویر ب تیره دیده می‌شود، ولی در تصویر الف قابل تشخیص نیست. تفاوت کیفیت دو تصویر در این شکل دیده می‌شود. پ) نسبت نواری b7/(b6+b8) در تصویر استر. نقاط روشن فراوانی دولومیت را در منطقه نشان می‌دهند. ت) فراوانی دگرسانی کائولینیتی به صورت پیکسل‌های روشن تصویر استر.

ترکیب‌های رنگی تهیه شده از نسبت‌های نـواری در تصـویر استر نتایج بهتری نسـبت بـه ترکیـب‌هـای رنگـی سـاده دارنـد (شکل‌های ۳ الف و ب). در تصویر OLI نیـز ایـن ترکیـب‌هـای رنگی توان بارزسازی بالاتری دارند (شکل‌های ۳ پ و ث).

تصاویر به دست آمده از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) در تصویر استر، نوارهای PC3 و PC4 مناطق کانه‌زایی شده را بـه رنگ روشن نمایش می‌دهند. در تصـویر رنگـی کـاذب، RGB: PC4, PC3, PC7 واحدهای سـنگ‌شناسـی بـه خـوبی از هـم تفکیک می‌شوند، به طوری که سازند سنگستان بـه رنـگ سـبز مایل به زرد، دولومیت‌های سازند تفت به رنگ نارنجی مایل بـه قهوه ای، سنگ آهک سازند تفت بـه رنـگ آبـی تیـره و سـازند آبکوه به رنگ آبی روشن بارزسـازی شـدند. گوسـان‌هـا و نقـاط دارای کانه‌زایی سرب و روی به رنگ زرد دیده می‌شوند (شـکل ۴ الف). این تصویر قـادر بـه نمـایش پهنـه کـالامین در بخـش شمال غربی کانسار نیست.



شکل ۳ الف) ترکیب رنگی کاذب RGB: b3/b2, (b6+b8)/b3, b3/b6 تصویر استر. ب) ترکیب رنگی RGB: b3/b2, b5/b3, b8/b4 در تصویر استر. در این دو تصویر، واحدهای سنگ‌شناسی به خوبی از هم تفکیک شده‌اند. پ) ترکیب رنگی RGB: b4/b3, b3/b2, b4/b2 تصویر OLI. گوسان در این تصویر به رنگ صورتی پررنگ، پهنه کالامین (C) به رنگ ارغوانی و دولومیت به رنگ سبز روشن دیده می‌شود. ت) ترکیب رنگی RGB: b6/b5, b7/b6, b5/b4 تصویر OLI که در آن کانه‌زایی به رنگ زرد و نارنجی دیده می شود. کان‌تن‌های تپه سیاه و کانسنگ شرقی به ترتیب با BH و ER نشان داده شده‌اند.



شکل ۴ الف) ترکیب رنگی کاذب شامل نوارهای PCA: 437 تصویر استر. در این تصویر، دولومیت به رنگ نارنجی، سازند سنگستان به رنگ سبز روشن، ساند آبکوه به رنگ آبی روشن و گوسان به رنگ سبز مایل به زرد دیده می‌شود. ب) ترکیب رنگی کاذب شامل مولفه‌های اصلی معکوس PCA: 135 تصویر استر. در این تصویر، باریت گوسان به رنگ سفید و گوسان به رنگ سبز مایل به زرد، سازند سنگستان به رنگ زرد قهوه‌ای و سازند آبکوه به رنگ صورتی دیده می‌شود. پ) ترکیب رنگی کاذب شامل نوارهای PCA: 345 تصویر OLI. باریت گوسان در این تصویر به رنگ قرمز، گوسان به رنگ زرد، دلومیت سبز، آهک زرد پررنگ-آبی و پهنه کالامین (C) زرد مایل به نارنجی دیده می‌شود. ت) ترکیب رنگی کاذب دربردارنده نوارهای PCA: 457 تصویر OLI. باریت گوسان در این تصویر به رنگ آبی، گوسان به رنگ ارغوانی و صورتی، دولومیت بنفش، آهک زرد و نارنجی، پهنه کالامین به رنگ قهوه‌ای دیده می‌شود. کان‌تن‌های تپه سیاه و کانسنگ شرقی به ترتیب با BH و ER نشان داده شده اند.

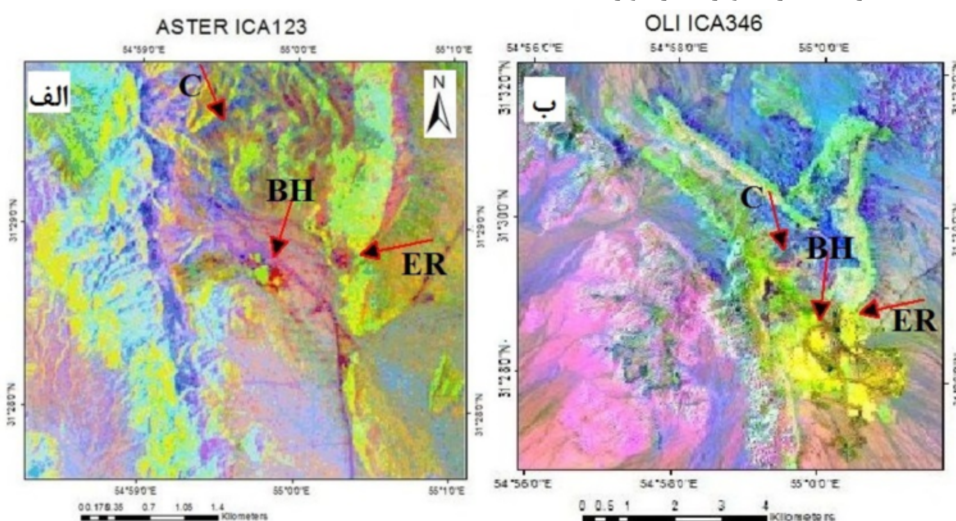
در تصویر RGB برآمده از روش PCA معکوس (شکل ۴ ب)، به جز پهنه کالامین، سایر پهنه‌های کانه‌زایی به خوبی از هم تفکیک شدند. در تصویر OLI، نوار PC3، و پس از آن PC4 بهترین بارزسازی را به نمایش می‌گذارند. در PC3 نقاط دارای کانه‌زایی سرب و روی، گوسان و کالامین به صورت پیکسل‌های روشن دیده می‌شوند. در ترکیب رنگی کاذبی که با استفاده از نوارهای RGB: PC3, PC4, PC5 تصویر OLI تهیه شد، سازند سنگستان به رنگ آبی تیره، دولومیت‌های سازند تفت به رنگ سبز، کانه‌زایی‌ها به رنگ زرد و کالامین به رنگ نارنجی مایل به صورتی نمایان گردید (شکل ۴ پ). سازند آبکوه نیز به رنگ بنفش مشخص شد. در ترکیب رنگی RGB: PC3, PC4, PC5 تصویر OLI، تمایز رنگی خوبی بین واحدهای سنگی ایجاد شد، ولی واحد کالامین در این تصویر بارزسازی نشد (شکل ۴ ث). در این تصویر سازند سنگستان به رنگ آبی تیره تا روشن، دولومیت و آهک سازند تفت به ترتیب به رنگ ارغوانی و زرد، و سازند آبکوه به رنگ سبز مشخص

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]

شدند. نقاط کانه‌زایی به رنگ صورتی مایل به بنفش دیده می‌شوند.

در تصویر به دست آمده از تحلیل مولفه‌های مستقل (ICA) در تصویر استر، در نوار IC9 و سپس IC2 کانه‌زایی به صورت پیکسل روشن نمایان می‌شود. ترکیب‌های رنگی RGB: IC2, IC9, IC6 و RGB: IC1, IC2, IC3 بیش از سایر ترکیب‌های رنگی تهیه شده می‌توانند کانه‌زایی را تفکیک کنند (شکل ۵ الف)، ولی در مقایسه با تصاویر ICA تصویر OLI موفقیت چندانی در تفکیک واحدهای سنگی و واحد کالامین ندارد. تصویر ICA تهیه شده از تصویر OLI منطقه مهدی‌آباد، نوار IC3 و پس از آن نوارهای IC4 و IC5 مناطق کانه‌دار را به صورت پیکسل‌های روشن نشان می‌دهد. در تصویر رنگی کاذب RGB: IC3, IC4, IC5 تهیه شده، کانه‌زایی به رنگ زرد روشن، سازند سنگستان به رنگ بنفش، دولومیت سازند تفت به رنگ سبز روشن و آهک به رنگ نارنجی دیده می‌شود (شکل ۵ ب). کالامین در این تصویر به رنگ سیاه با لبه نارنجی بارزسازی شد. در تصویر رنگی RGB: IC3, IC4, IC6 نیز، تفکیک واحدهای سنگ شناسی به خوبی انجام می‌شود. هر دوی این تصویرهای رنگی (شکل ۵ الف و ب) اخیر برای تهیه نقشه لیتولوژی منطقه مناسب است.

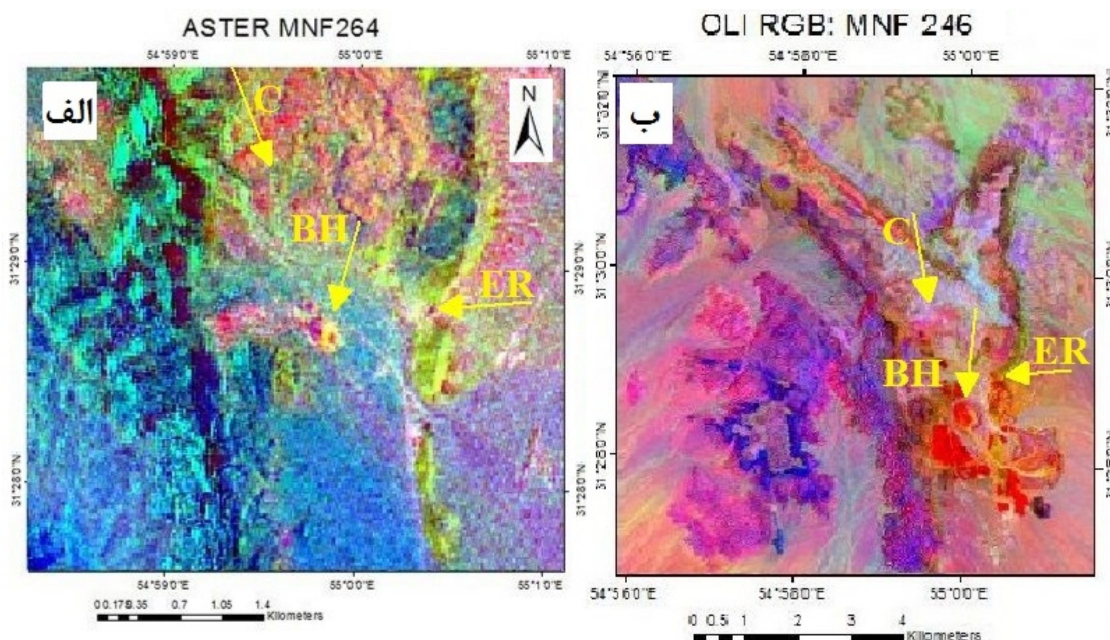
تبدیل کسر کمترین نوفه (MNF) برای هر دو تصویر استر و OLI منطقه مهدی‌آباد اجرا شد. در تصویر استر، نوار MNF2 بهتر از سایر نوارها کانه‌زایی را نشان می‌دهد. نوار MNF9 نیز مناطق کانه‌زایی شده را به رنگ روشن نشان می‌دهد، ولی نوفه بالایی در این نوار دیده می‌شود که استفاده از آن را محدود می‌کند. ترکیب‌های رنگی ساخته شده با نوارهای MNF تصویر استر وضوح چندان بالایی ندارند با این حال RGB: MNF2, MNF6, MNF4 بهتر از سایر ترکیب‌های رنگی MNF قادر به بارزسازی واحدهای سنگ‌شناسی است، به طوری که دولومیت به رنگ سبز روشن، سازند سنگستان به رنگ صورتی مایل به قرمز، سازند آبکوه به رنگ نارنجی مایل به قرمز، سنگ آهک سازند تفت آبی تیره، گوسان به رنگ زرد و گوسان باریت به رنگ قرمز مایل به بنفش دیده می‌شود. این تصویر توانایی بارزسازی واحد کالامین را ندارد، افزون بر این، رنگ واحد گوسان باریت نیز مشابه سازند سنگستان دیده می‌شود (شکل ۶ الف). در تصویر OLI، نوار MNF2 کانه‌زایی را به رنگ روشن بارزسازی می‌کند. در ترکیب رنگی RGB: MNF2, MNF4, MNF6 تصویر OLI، کانه‌زایی سرب و روی به رنگ قرمز، گوسان به رنگ زرد مایل به نارنجی، کالامین به رنگ صورتی روشن، دولومیت سازند تفت به رنگ سبز و سازند سنگستان صورتی مایل به بنفش دیده می‌شود (شکل ۶ الف). سنگ آهک سازند تفت به رنگ ارغوانی تا آبی تیره نمایان شد.



شکل ۵ الف) ترکیب رنگی کاذب دربردارنده نوارهای ICA: 123 تصویر استر. در این تصویر، دولومیت به رنگ به زرد، سازند سنگستان به رنگ سبز تیره، گوسان به رنگ سبز و باریت گوسان به رنگ قرمز دیده می‌شود. پهنه کالامین (C) به رنگ قهوه‌ای دراین تصویرنمایان شده است. ب) ترکیب رنگی کاذب شامل مولفه‌های مستقل ICA: 346 تصویر OLI . در این تصویر، باریت گوسان به رنگ زرد و گوسان به رنگ سبز، پهنه کالامین به رنگ بنفش، سازند سنگستان به رنگ آبی مایل به بنفش و سازند آبکوه به رنگ آبی تیره دیده می‌شود. کان‌تن‌های تپه سیاه و کانسنگ شرقی به ترتیب با BH و ER نشان داده شده‌اند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]



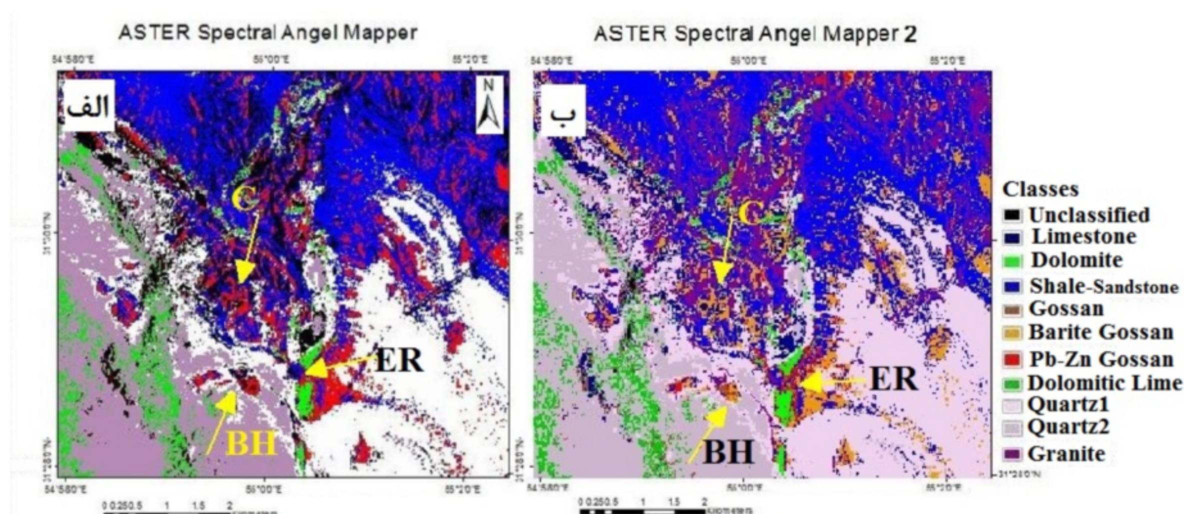
شکل ۶ الف) ترکیب رنگی کاذب شامل نوارهای MNF: 246 تصویر استر. در این تصویر، دولومیت به رنگ به سبز مایل بـه زرد، سـنگ آهـک بـه رنگ آبی، سازند سنگستان به رنگ صورتی مایل به قرمز، گوسان به رنگ ارغوانی و باریت گوسان به رنگ زرد دیده می‌شود. دولومیت‌های کانه‌زایی نشده در این تصویر به رنگ آبی فیروزه‌ای نمایان شده‌اند. ب) ترکیب رنگی کاذب دربردارنده نوارهای MNF: 246 در تصویر OLI. در این تصـویر، دولومیت به رنگ سبز، سنگ آهک به رنگ صورتی مایل به بنفش، باریت گوسان به رنگ قرمز روشن و گوسان به رنگ قرمز قهوه‌ای، پهنه کـالامین (C) به رنگ صورتی، سازند سنگستان به رنگ صورتی متمایل به بنفش و سازند آبکوه به رنگ آبی روشن دیده می‌شود. دولومیت کانه‌زایی نشده به رنگ ارغوانی ظاهر شده است. کان‌تن‌های تپه سیاه و کانسنگ شرقی به ترتیب با BH و ER نشان داده شده‌اند.

در این تصویر، بارزسازی سنگ آهک چندان موفقیـت آمیـز نیست، در حالیکه سـایر واحـدهای سـنگ شناسـی بـه خـوبی مشخص شدند. به طور کلی، به نظر می‌رسد که در مورد تصـویر استر، روش‌های PCA و ICA عملکرد بهتری دارند.

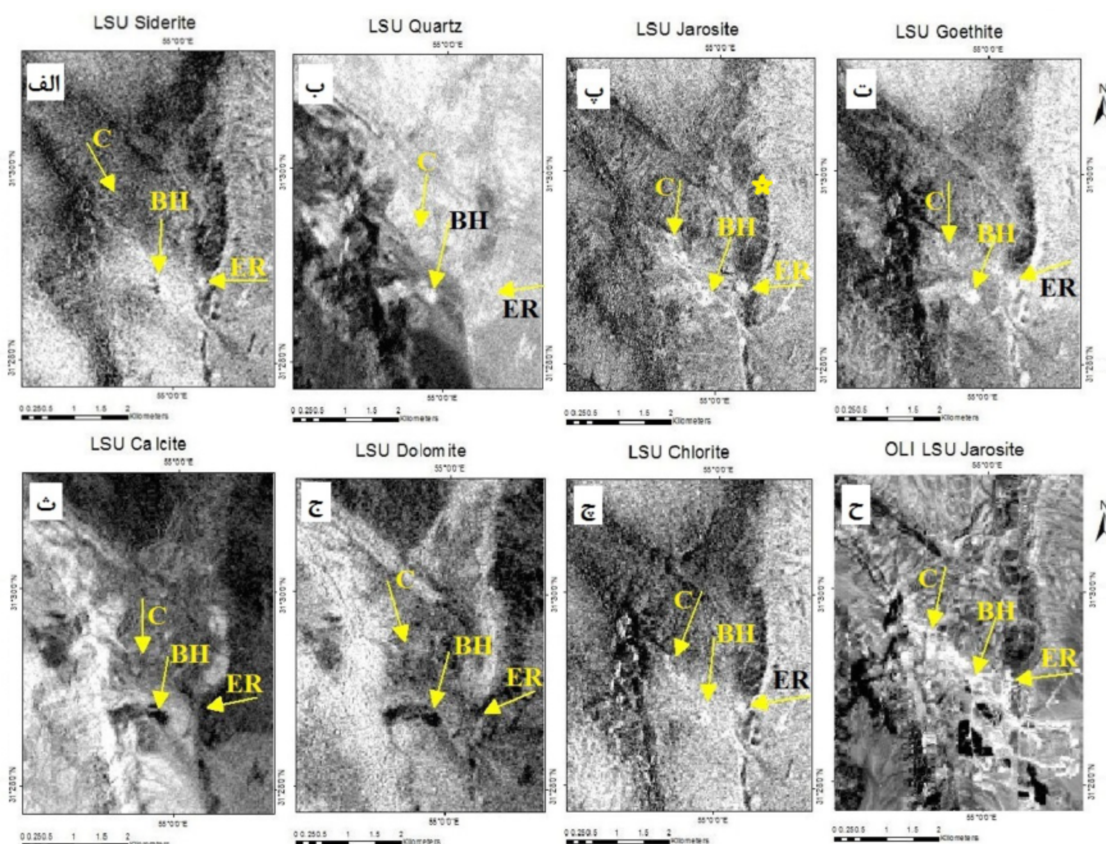
روش خالص‌سازی پیکسل‌ها (PPI) بر تصـویرMNF تهیـه شده از تصویر استر اعمال شد. پیکسل‌های پایانی به دست آمده مربوط به گوسان، باریت گوسان، سـنگ آهـک و دولومیـت بـه خوبی مشخص شـدند. از ایـن روش مـی‌تـوان بـرای بارزسـازی توده‌های کانه‌زایی شده استفاده کرد.

رده‌بندی به روش نقشه‌برداری زاویه طیفی بـه دو روش بـر تصویر استر منطقه مهدی‌آباد اعمال شد. ایـن کـار در روش اول با استفاده از کتابخانه طیفی USGS (شکل ۷ الـف) و در روش دوم با انتخاب مناطق آموزشـی بـر اسـاس نقشـه‌هـای موجـود (شکل ۷ ب) انجام شد. تصاویر به دست آمده شـباهت بسـیاری به هم دارند، با این تفاوت که در تصـویر نخسـت، گوسـان‌هـای Pb-Zn دار نیز معرفی شدند، ولی منـاطق رده‌بنـدی شـده بـه عنوان گوسان Pb-Zn چندان بر واقعیت منطبق نیست. افـزون بر این، در هر دو تصویر بخش‌هایی از ماسه‌سـنگ‌هـای سـازند سنگستان به دلیل دارا بودن اکسیدها و هیدروکسیدهای آهـن، به عنوان گوسان رده‌بنـدی شـده‌انـد، کـه بـا داده‌هـای موجـود همخوانی ندارد. با این حال، هر دو روش می‌تواننـد در تفکیـک واحدهای سنگ شناسی تا حدی موفق عمل کنند، که در کنـار سایر الگوریتم‌ها مـی‌تواننـد بـرای تهیـه نقشـه سـنگ شناسـی منطقه به کار گرفته شوند [۳۸].

روش جداسازی طیفی خطی (LSU) با استفاده از کتابخانه طیفی USGS بر تصاویر استر و OLI اعمال شد، که موفـق بـه شناسایی تعدادی از کانی‌های موجود از جمله سیدریت، کوارتز، گوتیت و جاروسیت در منطقـه گردیـد (شـکل ۸). تصـاویر بـه دست آمده با این روش از تصویر اسـتر قابـل قبـول‌تـر بـه نظـر می‌رسد. با توجه به الگوی سنگ شناسی، دگرسـانی و وضـعیت گسل ها در منطقه، نقطه ای در شمال شرقی کانسـار (شـکل ۸ پ) می‌تواند دارای پتانسـیل کانـه‌زایـی در نظـر گرفتـه شـود و بررسی های بیشتر بر آن انجام شود.



شکل ۷ نتایج به دست آمده از روش رده‌بندی نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM): الف) با استفاده از کتابخانه طیفی USGS و ب) به روش انتخاب مناطق آموزشی. نتایج دو روش همخوانی بسیاری با هم دارند. سنگ آهک، دولومیت و گوسان در هر دو روش به خوبی بارز شده است. پهنه کالامین و کان‌تن‌های تپه سیاه و کانسنگ شرقی به ترتیب با C، BH و ER نشان داده شده‌اند.



شکل ۸ نتایج به دست آمده از اجرای روش LSU بر تصویرهای استر و OLI: الف) بارزسازی مناطق دارای کانی سیدریت در تصویر استر. ب) مناطق دارای کانی کوارتز در تصویر استر که سازند سنگستان به رنگ روشن و سازند آبکوه به رنگ خاکستری روشن مشخص شده‌اند، پ) بارزسازی کانی جاروسیت در تصویر استر. گوسان‌ها که بر روی نقاط کانه‌زایی شده قرار دارند به رنگ روشن دیده می‌شوند. علامت ستاره می‌تواند نقطه دارای پتانسیل برای مراحل بعدی اکتشاف در نظر قرار گیرد. ت) مناطق دارای کانی گوتیت در تصویر استر. مناطق دارای کانه‌زایی و سازند سنگستان به رنگ روشن نمایان شده‌اند. ث) فراوانی کانی کلسیت و ج) فراوانی کانی دولومیت در تصویر استر، چ) دگرسانی کلریتی در مناطق کانه‌زایی شده در تصویر استر و ح) جاروسیت در تصویر OLI که مشابه تصویر استر و با جزییات بیشتر است.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]

بحث

در این پژوهش، بارزسازی مناطق دارای کانه‌زایی سرب-روی و تفکیک واحدهای سنگ‌شناسی در منطقه مهدی‌آباد با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استر و لندست OLI-۸ بررسی شد. وجود اکسیدهای آهن سه ظرفیتی (هماتیت و گوتیت) در بخش‌های اکسید شده مناطق کانه‌زایی شده و نیز آهن دو ظرفیتی در قالب کانی سیدریت و آنکریت در پهنه دگرسانی در سایر کانسارهای نوع دره می سی سی پی (MVT) نیز گزارش شده است [۳۹]. با توجه به اکسیدی بودن کانه‌ها در بخش‌های سطحی کانسار مهدی‌آباد، تمرکز بر بارزسازی کانی‌های اکسیدی و کربناتی نتایج بهتری دربرداشت. فراوانی کانی‌های اکسیدی- هیدروکسیدی آهن سه ظرفیتی مانند گوتیت، هماتیت و جاروسیت (پهنه گوسان) در بخش‌های سطحی کانسار مهدی آباد و سایر کانسارهای مشابه مانند کانسار فلات سیترونن در گرینلند [۳۹] می‌تواند به عنوان معیاری در پی جویی و اکتشاف این کانسارها در نظر گرفته شود. هر چند در منطقه مهدی آباد، اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن افزون بر پهنه گوسان در ماسه سنگ‌های سازند سنگستان نیز دیده می‌شوند. از این رو، بارزسازی کانی سیدریت که کانی همراه با کانه‌زایی در کانسار است (شکل ۹ الف)، می‌تواند نقش مهمی در تفکیک گوسان‌های مناطق کانه‌زایی شده از ماسه سنگ سازند سنگستان و در نتیجه انتخاب مناطق امیدبخش داشته باشد. حضور کوارتز در سازند سنگستان و نبود این کانی در مناطق کانه‌زایی شده نیز می‌تواند به این تفکیک کمک نماید. کانی‌های دارای Fe^{2+} می‌توانند جذب گسترده ای در طول موج ۰٫۹-۱٫۲ میکرومتر نشان دهند، در حالیکه اکسیدهای Fe^{3+} ناشی از اکسایش در گستره ۰٫۴۵-۰٫۹ میکرومتر (نوارهای ۱ تا ۳ استر و نوارهای ۳ و ۴ OLI) جذب انجام می‌دهند. شدت جذب این گستره‌های طول موجی با افزایش تمرکز Fe^{2+} و یا Fe^{3+} در سنگ یا کانی افزایش می‌یابد [۳۹]. جاروسیت با ترکیب شیمیایی $K(Fe^{3+})_3(OH)_6(SO_4)_2$، یک کانی رایج در محیط‌های اسیدی و غنی از سولفات است که بر اثر اکسایش سولفیدها، به ویژه پیریت تشکیل می‌شود [۳۹،۳۳]. جاروسیت در گستره‌های طول موجی VNIR و SWIR از جذب ویژه‌ای برخوردار است [۱۳]. این کانی بیشترین بازتاب موضعی را در نزدیکی ۰٫۷۰ میکرومتر نشان می‌دهد و به طور کلی بازتاب شدیدتری نسبت به گوتیت یا هماتیت دارد. روش‌های مختلفی مانند نسبت‌گیری نواری می‌تواند در تفکیک این واحدها نقش داشته باشد. بسیاری از کانی‌های کربناتی در گستره طول موجی ۲.۳۳ - ۲.۳۱ میکرومتر (نوار ۸) جذب نشان می‌دهند. دولومیت به دلیل جذب CO_3 در ۲٫۲۶ میکرومتر، در گستره نوار ۷ جذب بالاتری نسبت به کلسیت دارد [۳۳].



شکل ۹ واحدهای مختلف سنگ‌شناسی در کانسار مهدی‌آباد. الف) سازندهای تفت و سنگستان (.Sang) در کنار توده معدنی تپه سیاه که در حال بهره برداری است. واحد گوسان شامل گوتیت، جاروسیت و هماتیت در این تصویر دیده می‌شود. ب) واحدهای گوسان، سیدریت و باریت (سفید رنگ) در سینه کار معدن مهدی‌آباد، توده معدنی تپه سیاه.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]

در منطقه مهدی آباد، روش نسبت‌گیری نواری برای بارزسازی اکسیدهای آهن در هر دو تصویر استر و OLI نتیجه مشابهی دارد، با این تفاوت که در تصویر OLI به دلیل بالاتر بودن قدرت تفکیک پرتوسنجی، تصویر به دست آمده از نسبت‌های نواری وضوح بیشتری دارد. واحدهای دولومیتی نیز به روش نسبت‌گیری نواری از تصویر استر بارزسازی شدند که با نقشه‌های زمین‌شناسی و نتایج برآمده از سایر روش‌های مورد استفاده مانند روش رده‌بندی نظارت شده (SAM) و جداسازی طیفی خطی (LSU) همخوانی دارد. ترکیب‌های رنگی کاذب تهیه شده از تصویر استر منطقه، توانایی تفکیک واحدهای سنگ شناسی را ندارند، ولی ترکیب رنگی RGB: 742 پهنه کانه‌زایی شده تپه سیاه را متفاوت از سایر واحدهای منطقه نشان می‌دهد. با این وجود، ترکیب‌های رنگی تهیه شده با استفاده از نسبت‌های نواری عملکرد خوبی دارند، به طوری که در ترکیب رنگی کاذب RGB: b3/b2, b6+b8/b4, b3/b6 و RGB: b3/b2, b5/b3, b8/b4 تصویر استر، واحدهای سنگ شناسی به خوبی از هم تفکیک شده‌اند. هر چند در RGB: b6/b5, b7/b6, b5/b4 تصویر OLI، جزییات بیشتری از واحدهای سنگ شناسی بارز می‌شود.

به همین ترتیب، تصاویر برآمده از تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA) در تصویر OLI جزییات به مراتب بیشتری نسبت به تصویر استر به نمایش می‌گذارد (شکل ۶). در روش معکوس، پهنه گوسان و باریت گوسان بارزسازی شدند، که این روش در تصاویر استر بهتر از روش PCA مستقیم عمل می‌کند. در مورد کانه‌زایی، تصویر RGB تهیه شده از نوارهای PC تصویر OLI، افزون بر پهنه‌های تپه سیاه و پهنه شرقی، پهنه کالامین را نیز بارزسازی می‌کند، ولی تصویر استر قادر به بارزسازی پهنه کالامین نبود. در تصویر به دست آمده از روش تحلیل مولفه‌های مستقل (ICA) در تصویر استر افزون بر توده معدنی تپه سیاه (بخش‌های گوسان و باریت گوسان) توده معدنی پهنه شرقی و پهنه کالامین نیز بارزسازی شدند (شکل ۷). در این تصویر واحدهای سنگ شناسی نیز به خوبی تفکیک شدند، هر چند جزییات بر تصویر OLI آشکارتر دیده می‌شود. روش ICA پتانسیل بالایی برای تفکیک واحدهای Fe^{2+}دار دارد که در تفکیک دولومیت های میزبان در کانسارهای MVT اهمیت دارد [۳۹]. این مناطق که در شکل ۶ الف به رنگ صورتی مشخص هستند، در تصویر ۹ الف به صورت مناطقی با فراوانی دولومیت و سیدریت مشخص می شوند. در واقع، مناطق دارای Fe^{2+} که پس از اکسایش به صورت پهنه گوسان درآمده اند، می توانند در پی جویی این کانسارها موثر باشند.

روش MNF پیاده شده بر تصویر استر قادر به تفکیک دولومیت از سنگ آهک و بارزسازی پهنه گوسان و باریت گوسان در پهنه تپه سیاه بود (شکل ۷ الف). در تصویر OLI به دست آمده از این روش، نوفه کمتری نسبت به تصاویر برآمده از سایر روش‌ها وجود دارد (شکل ۷ ب). در این دو تصویر نیز مانند روش PCA، دولومیت‌های همراه با کانه‌زایی از سایر دولومیت‌های سازند تفت تفکیک شدند، در حالیکه در روش ICA دولومیت‌های کانه‌زایی و دولومیت‌های بدون کانه‌زایی به یک رنگ دیده می‌شوند.

در روش خالص‌سازی پیکسل‌ها (PPI)، گوسان و باریت گوسان، آهک و تا حدی دولومیت مشخص شد. روش رده‌بندی نقشه‌برداری زاویه طیفی (SAM) به هر دو صورت، اجرا شده با استفاده از کتابخانه طیفی USGS و با انتخاب مناطق آموزشی می‌تواند واحدهای سنگی را به خوبی از هم تفکیک کند. به ویژه دولومیت‌های کانه‌زایی شده و بدون کانه‌زایی از هم تفکیک می‌شوند؛ پهنه گوسان نیز به خوبی مشخص می‌شوند.
سرانجام به منظور سنجش درستی نتایج به دست آمده از روش‌های به کار رفته، عملیات صحرایی انجام شد. در این بازدید، دو نمونه از پهنه تپه سیاه و کانسنگ شرقی انتخاب و ترکیب کانی شناسی کانسنگ‌ها با روش XRD بررسی شدند (جدول ۱ و شکل ۹).

جدول ۱ نتایج تحلیل XRD دو نمونه از کانسنگ‌های معدن مهدی‌آباد.

نمونه	X	Y	مجموعه کانیایی
تپه سیاه	310104.383	3483879.714	سیدریت+سفالریت+اسمیتسونیت+باریت+گالن+کوارتز+اولیگونیت
لبه شرقی	310651.443	3484025.211	گوتیت+هماتیت+کالکوفانیت+همیمورفیت+باریت+دولومیت+کلسیت+لپیدوکروسیت+سروسیت

برداشت

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.3.12.6]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.3.697]

بر اساس نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان برای بارزسازی کانه‌زایی سرب و روی، از کانی‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن موجود در گوسان و سیدریت استفاده نمود. سیدریت به عنوان کانی دگرسانی همراه با کانه‌زایی سرب و روی حضور دارد که می‌تواند به صورت غیرمستقیم در اکتشاف کانسارهای مشابه استفاده شود. کانی سیدریت در تصاویر استر به روش LSU به خوبی قابل تشخیص است. با توجه به اینکه تصاویر استر دارای نوارهای بیشتری در گستره SWIR هستند، روش LSU در این تصاویر نتایج بهتری نسبت به تصاویر OLI ارائه می‌دهد. در تصویر استر بهترین نتایج بارزسازی کانه‌زایی سرب و روی از روش‌های ICA و LSU به دست آمد. در تفکیک واحدهای سنگ شناسی در این تصاویر، روش MNF عملکرد بهتری دارد. در تصاویر OLI در بارزسازی کانه‌زایی روش‌های ICA ،PCA و RGB های شامل نسبت‌های نواری عملکرد بسیار خوبی دارند. روش ICA در تفکیک پهنه های گوسان و باریت گوسان در تصویر استر، و روش MNF در تفکیک دولومیت های کانه زایی شده از سایر دولومیت‌ها اهمیت دارند. در تفکیک واحدهای سنگ شناسی در این تصاویر، روش‌های MNF و PCA موفق‌تر از روش ICA هستند.

به طور کلی، روش های به کار رفته در بارزسازی کانه زایی در تصاویر استر و OLI هم‌پوشی خوبی دارند. پهنه کالامین در تصویر استر تنها در تصویر برآمده از ICA بارزسازی می شود، ولی در تصویر OLI همه روش ها پهنه کالامین را آشکار می سازند. روش های SAM و LSU نیز در تصاویر استر با نتایج سایر روش ها همخوانی خوبی دارند.

تصاویر OLI به دلیل قدرت تفکیک پرتوسنجی بالاتر و به روز بودن، واضح‌تر بوده و جزییات بیشتری را به نمایش می‌گذارند. با اینکه این تصاویر در روش LSU به خوبی تصاویر استر عمل نمی‌کنند، ولی در سایر روش‌ها عملکرد به مراتب رضایت‌بخش‌تری دارند. شباهت‌های سنگ‌شناسی و دگرسانی در بخش‌های شمال‌شرقی کانسار (شکل ۸ پ؛ به فاصله ۲٫۲۸ کیلومتر از توده تپه سیاه) می‌تواند برای اکتشاف بعدی کانه زایی روی-سرب در نظر قرار گیرد.

مراجع

[1] Rowan L. C., Wetlaufer P. H., Goetz A. F. H., Stewart J. H., *"Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images,"* 1976.

[2] Rowan L. C., Goetz A. F., Ashley R. P., *"Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images," Geophysics*, vol. 42, no. 3, pp. 522–535, 1977.

[3] Abrams M. J., Brown D., Lepley L., Sadowski R., *"Remote sensing for porphyry copper deposits in southern Arizona," Econ. Geol.*, vol. 78, no. 4, pp. 591–604, 1983.

[4] Hunt G. R., *"Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared," Geophysics*, vol. 42, no. 3, pp. 501–513, 1977.

[5] Crosta A. P., Souza Filho C. R. De, Azevedo F., Brodie C., *"Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTERASTER imagery and principal component analysis," Int. J. Remote Sens.*, vol. 24, no. 21, pp. 4233–4240, 2003.

[6] Di Tommaso I., Rubinstein N., *"Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina," Ore Geol. Rev.*, vol. 32, no. 1–2, pp. 275–290, 2007.

[7] Adiri Z., El Harti A., Jellouli A., Maacha L., Bachaoui E. M., *"Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Moroccan Anti Atlas," J. Appl. Remote Sens.*, vol. 10, no. 1, p. 016005, 2016.

[8] Ranjbar H., Shahriari H., *"Comparison of ETM+ and ASTER data for hydrothermal alteration mapping in the central part of the Dehaj-Sarduyeh belt, Kerman Province.," Iran. J. Crystallogr. Mineral.*, vol. 14, no. 2, pp. 367–382, Oct. 2006.

[9] Mohammadzadeh M. J., Falahat R., *"Application of ET~ image in detecting alteration halos and discriminating lithological units in Mianeh (eastAzarbayjan)," Iran. J. Crystallogr. Mineral.*, vol. 15, no. 2, pp. 439–452, Oct. 2007.

[10] Hassan S. M., Ramadan T. M., *"Mapping of the late Neoproterozoic Basement rocks and detection of the gold-bearing alteration zones at Abu Marawat-Semna area, EASTERn Desert, Egypt using remote sensing data," Arab. J. Geosci.*, vol. 8, no. 7, pp. 4641–4656, 2015.

[11] Yang M., Zhang Z., Yao A., Zhou M., Ren G., "*Application of remotely sensed data in detecting zinc-lead bearing mineralized zones in Westkunlun Huoshaoyun area,"* in *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 1053, p. 012107.

[12] Markham B. L. *et al.*, *"Landsat data continuity mission calibration and validation,"* 2008.

[13] Beiranvand Pour A., Hashim M., *"Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eASTERn Islamic Republic of Iran," J. Taibah Univ. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 155–166, 2015.

[14] Pournamdari M., Hashim M., *"Detection of chromite bearing mineralized zones in Abdasht ophiolite complex using ASTER and ETM+ remote sensing data," Arab. J. Geosci.*, vol. 7, no. 5, pp. 1973–1983, 2014.

[15] Maghfouri S., Hosseinzadeh M. R., Rajabi A., Choulet F., *"A review of major non-sulfide zinc deposits in Iran," Geosci. Front.*, vol. 9, no. 1, pp.

[28] Luo G., Chen G., Tian L., Qin K., Qian S.-E., *"Minimum noise fraction versus principal component analysis as a preprocessing step for hyperspectral imagery denoising," Can. J. Remote Sens.*, vol. 42, no. 2, pp. 106–116, 2016.

[29] Green A. A., Berman M., Switzer P., Craig M., *"A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 26, no. 1, pp. 65–74, 1988.

[30] Boardman J. W., *"Leveraging the high dimensionality of AVIRIS data for improved sub-pixel target unmixing and rejection of false positives: mixture tuned matched filtering,"* in *Summaries of the seventh JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication, 1998*, 1998, vol. 97, pp. 55–56.

[31] Atkinson P. M., Cutler M. E. J., Lewis H., *"Mapping sub-pixel proportional land cover with AVHRR imagery," Int. J. Remote Sens.*, vol. 18, no. 4, pp. 917–935, 1997.

[32] Wu C., Murray A. T., *"Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis," Remote Sens. Environ.*, vol. 84, no. 4, pp. 493–505, 2003.

[33] Akbari Z., Rasa I., Mohajel M., Adabi M. H., Y. A, *"Hydrothermal Alteration of Ahangaran Deposits, West of IranUsing ASTER Spectral Analysis," Int. Geoinformatics Res. Dev.*, 2015.

[34] Janati M., Niroomand Jadidi M., Valadanzoj M. J., Mohammadzadeh A., *"Extraction of pure pixels using feature-based space Physical Parameters to Estimate Surface Coverage Subpixel," J. Spat. Plan.*, vol. 12, no. 17, pp. 1–20, 2013.

[35] Fisher P., *"The pixel: a snare and a delusion," Int. J. Remote Sens.*, vol. 18, no. 3, pp. 679–685, 1997.

[36] Cracknell A. P., *"Review article synergy in remote sensing-what's in a pixel?," Int. J. Remote Sens.*, vol. 19, no. 11, pp. 2025–2047, 1998.

[37] Foody G. M., *"Sub-pixel methods in remote sensing,"* in *Remote sensing image analysis: Including the spatial domain*, Springer, 2004, pp. 37–49.

[38] Entezari Harsini A., Mazaheri S. A., Saadat S., *"Petrography, mineralogy, alteration zones and geochemical exploration in Golcheshmeh Area, East of Iran.," Iran. J. Crystallogr. Mineral.*, vol. 23, no. 4, pp. 639–650, Jan. 2016.

[39] Beiranvand Pour A., et al., *"Application of Multi-Sensor Satellite Data for Exploration of Zn–Pb Sulfide Mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland,"* Remote Sens., vol. 10, no. 8, p. 1186, Aug. 2018, doi: 10.3390/rs10081186.

249–272, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.04.003.

[16] Ghasemi M., Momenzadeh M., Yaghubpur A., Mirshokraei A. A., *"Mineralogy Studies of Mehdiabad Zinc-Lead Deposit- Yazd, Central Iran," J. Geosci.*, vol. 19, no. 73, pp. 89–98, 2010, doi: 10.22071/gsj.2010.57204.

[17] Ghasemi M., Mohammadzadeh M., Yaghubpur A., Mirshokraei A. A., *"Mineralogy and Textural Studies of Mehdiabad Zinc-Lead Deposit- Yazd, Central Iran.," Iran. J. Crystallogr. Mineral.*, vol. 16, no. 3, pp. 389–404, Oct. 2008.

[18] Morshedy A. H., Mojtahedzadeh S. H., Kouhsari A. H., *"Geometrical modeling of fluid inclusion to predict the microthermometric properties: a case study at the Mehdiabad Pb-Zn deposit," J. Econ. Geol.*, vol. 11, no. 1, 2019.

[19] Reichert J., Borg J., Rashidi B., *"mineralogy of Non - sulphied ore from the mehdi abad zinc - lead deposit, centeral. iran.," Iran. J. Crystallogr. Mineral.*, vol. 11, no. 2, pp. 209–217, Oct. 2003.

[20] Nabavi M. H., *"Yazd 1:250, 000 quadrangle geological map: Geological Survey of Iran,"* Geological Survey of Iran, 1975.

[21] Amini B., *"Bafq 1:100, 000 quadrangle geological map,"* Geological Survey of Iran, 2001.

[22] Jalali A., Gharib F., *"Fahraj 1:100,000 quadrangle geological map,"* Geological Survey of Iran, 2004.

[23] Majidifard M. R., Vaziri S. H., *"Bahadoran 1:100,000 quadrangle geological map*," Geological Survey of Iran, 2000.

[24] Alavipanah S., K., *Modern Remote Sensing Interpretation of Satellite Images and Aerial Photographs*. University of Tehran Publication, 2009.

[25] Mahmoudishadi S., Malian A., Hosseinali F., *"COMPARING INDEPENDENT COMPONENT ANALYSIS WITH PRINCIPLE COMPONENT ANALYSIS IN DETECTING ALTERATIONS OF PORPHYRY COPPER DEPOSIT (CASE STUDY: ARDESTAN AREA, CENTRAL IRAN).," Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 42, 2017.

[26] Kumar C., Shetty A., Raval S., Sharma R., Ray P. C., *"Lithological discrimination and mapping using ASTER SWIR Data in the Udaipur area of Rajasthan, India," Procedia Earth Planet. Sci.*, vol. 11, pp. 180–188, 2015.

[27] Hasanlou M., Samadzadegan F., *"Comparative study of intrinsic dimensionality estimation and dimension reduction techniques on hyperspectral images using K-NN classifier," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 9, no. 6, pp. 1046–1050, 2012.